第46卷 第4期
2023年4月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 4
Apr. 2023

"三生"空间视角下西北地区生态环境质量分异机制的地理探测

董建红[1]，张志斌[2]，刘奔腾[1]，张新红[1]

（1. 兰州理工大学设计艺术学院，甘肃 兰州 730050；2. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：基于土地"三生"功能视角，采用生态环境质量指数测度2000—2020年西北地区土地利用转型的生态环境效应，并且综合运用热点分析工具、地理探测器等方法探讨生态环境质量的演变特征与分异机制。结果表明：(1) 西北地区"三生"空间地域分异显著；"三生"空间结构演化呈生产、生活空间增加，生态空间缩减的变化趋势。(2) 生态环境质量指数从2000年的0.22720升至2010年的0.22724后降至2020年的0.22699，生态环境质量整体保持相对稳定。(3) 生态环境质量空间上呈"东南较高、西北次之，中部较低"的格局特征，生态环境质量格局演化的冷、热点区主要聚集于东南和西北部，与区域内人口、产业的空间分布具有趋同性。(4) 生态用地结构、归一化植被指数和人类活动是生态环境质量空间分异的主导因素，自然因子内部以及自然因子与社会经济因子的交互协同作用共同影响了区域生态环境质量的空间分异效果。

关 键 词：土地利用转型；生态环境质量；空间分异；西北地区

文章编号：1000-6060(2023)04-0515-12(0515~0526)

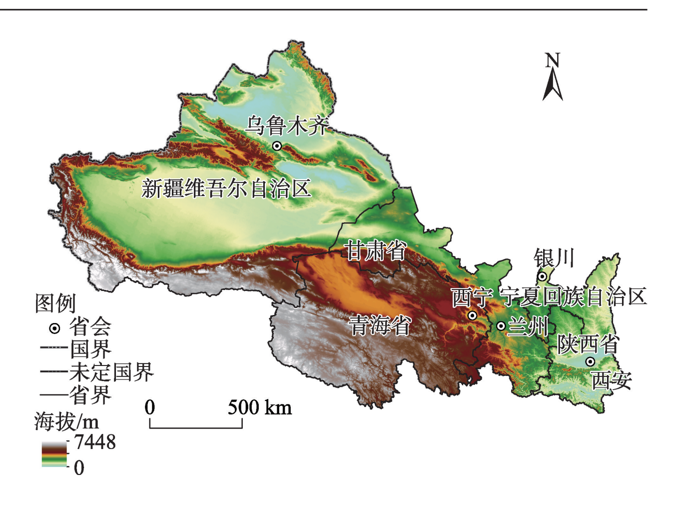
经济社会的快速发展以及城镇化和工业化的深入推进引发了土地利用的不断转型和空间重构，改变了自然生态系统的结构和功能，甚至威胁到区域生态安全和生态系统服务的可持续性[1]。土地利用功能（生产、生活、生态功能）转型作为土地利用转型的主要形式，成为土地利用覆被变化（Land use and cover change，LUCC）研究的新途径，被广泛认为是引起全球生态环境变化的原因之一[2-3]。

目前，围绕"三生"空间的相关研究主要聚焦于"三生"空间的内涵框架[4]、分类体系[5-6]、功能识别[7]、结构演化[8-9]、驱动机制[10]、耦合协调[11-12]、功能冲突[13]以及国土空间适宜性评价[14]和国土空间分区[15]等方面。而鲜有研究将"三生"空间演化与区域生态环境质量关联起来，探讨土地利用转型生态环境效应的演变特征与空间分异机制[16]。土地利用转型主要通过对区域生态环境要素（大气、土壤、水、生物）的影响进而导致生态系统结构和功能发生变化[17-21]。有关土地利用转型生态环境效应的测度主要采用两种方式：一是利用植被净初级生产力（Net primary productivity，NPP）[22]、归一化植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）[23]、增强型植被指数（Enhanced vegetation index，EVI）[24]、遥感生态指数（Remote sensing ecological index，RSEI）[25-26]等反映地表生物量的指标来表征；二是采用生态环境质量指数（Eco-environmental quality index，EQI）[16]、生态系统服务价值模型（Ecosystem service value，ESV）[27-28]等基于土地利用覆被变化过程的定量测度。其中，EQI应用较为广泛，其在充分考虑地类生态差异性的基础上，构建LUCC与生态环境质量的关联关系，进而刻画生态环境质量的演化过程及其特征[3,21]。此外，区域生态环境质量的空间分异格局是自然禀赋条件、社会经济因子和生态政策等要素

收稿日期：2022-05-24； **修订日期**：2022-09-11
基金项目：国家自然科学基金项目（42261034，41961029）；甘肃省住房和城乡建设厅科研项目（JK2022-16）资助
作者简介：董建红（1985-），男，博士，讲师，主要从事城乡规划与国土评价等方面的研究. E-mail: dongjh@lut.edu.cn
通讯作者：张新红（1981-），男，博士，副教授，主要从事城市与区域规划等方面的研究. E-mail: zhangxh1981@lut.edu.cn

复杂耦合作用过程在空间上的表征结果，而地理探测器模型在分析地理要素格局演变和地域空间分异等方面应用广泛[29-30]。

综上所述，国内外学者针对“三生”空间开展了较多的理论分析和实践研究，但还有待进一步深入探讨：一是“三生”空间演化生态效应分析对于干旱区生态建设至关重要，而现有文献关注较少；二是部分研究刻画了“三生”空间转型生态环境效应的演变特征，但缺乏分异机制的探讨。鉴于此，本文从“三生”空间土地利用功能分类视角，探讨西北地区土地利用转型生态环境效应的演变特征与空间分异机制，以期为区域国土空间格局优化、生态规划政策制定和生态系统风险管控提供借鉴。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2923号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 西北地区示意图

Fig. 1 Map of northwest China

1 研究区概况

西北地区地理位置介于75°14′~110°13′E、32°12′~48°03′N之间，行政区划上包括新疆、青海、甘肃、陕西和宁夏五省区，拥有广阔的土地资源和丰富的光热资源，是我国重要的生态屏障区、国家战略的回旋空间以及向西开放的核心区，但也是推进区域协调发展和实现共同富裕的短板和难点（图1）。由于地处干旱半干旱区，降水稀少且时空分布不均，蒸发量大，是中国荒漠化和干旱最为严重的地区之一，生态环境具有原生的脆弱性，生态系统保护压力较大。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

2000、2010、2020年土地利用数据（1 km×1 km）来源于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn/），综合精度达95%以上[31]。本文在参考相关研究的基础上构建“三生”空间分类体系[16]，并基于已有研究制定的生态环境质量值[32]，采用面积加权法对“三生”空间各地类的生态环境质量进行赋值（表1）。

生态环境质量变化的驱动因子指标选择主要考虑了自然条件、社会经济和生态政策等因素（表2）。首先，对选取的驱动因子进行了KMO和Bartlett检验，结果显示KMO检验值为0.891，且Bartlett’s检验值在P=0.000上均显著，说明因子选择较为合理；其次，将所获取的因子转换为统一的坐标和投影，并重采样为1 km空间分辨率的栅格数据；最后将栅格化的因子与县域行政单元进行空间连接，并采用自然断点法分类离散化形成类型数据集（图2）。

表1 “三生”空间土地利用分类及其生态环境质量指数

Tab. 1 Land use classification of production-living-ecological and eco-environmental quality index

一级分类	二级分类	土地利用分类系统的二级地类	EQI
生活用地	城镇生活用地	城镇用地	0.200
	农村生活用地	农村居民点	0.200
生产用地	农业生产用地	水田、旱地	0.253
	工矿生产用地	其他建设用地	0.150
生态用地	牧草生态用地	高、中、低覆盖度草地	0.381
	林地生态用地	灌木林地、有林地、疏林地、其他林地	0.713
	水域生态用地	永久性冰川积雪、湖泊、水库坑塘、河渠	0.772
	其他生态用地	戈壁、沙地、沼泽地、盐碱地、裸岩石砾地、高寒荒漠、裸土地、滩地	0.022

注：EQI为生态环境质量指数。

表2　地理探测指标体系

Tab. 2　Geographic detection index system

一级指标	指标	变量	分辨率	年份	数据来源及处理
自然条件	高程/m	X_1	30 m×30 m	–	中国科学院地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
	坡度/(°)	X_2	30 m×30 m	–	中国科学院地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
	≥10 ℃积温/℃	X_3	1 km×1 km	2010—2020	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
	年均降水量/mm	X_4	1 km×1 km	2010—2020	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
	湿润指数	X_5	1 km×1 km	2010—2020	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
	NDVI	X_6	1 km×1 km	2018	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
	NPP/gC·m^{-2}	X_7	1 km×1 km	2010	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
	土壤侵蚀/t·km^{-2}·a^{-1}	X_8	1 km×1 km	2010	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
	生态用地占比/%	X_9	1 km×1 km	2020	生态用地占比通过提取生态用地面积获得
社会经济	人口密度/人·km^{-2}	X_{10}	1 km×1 km	2019	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
	地均GDP/10^{4}元	X_{11}	1 km×1 km	2019	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
	夜间灯光强度/nW·cm^{-2}·sr^{-1}	X_{12}	1 km×1 km	2020	国家地球系统科学数据中心(www.geodata.cn)
	距市中心距离/km	X_{13}	1 km×1 km	–	基于百度地图获取各县区中心点坐标,通过ArcGIS欧氏距离工具计算获得
	道路密度/km·km^{-2}	X_{14}	1 km×1 km	2017	国家基础地理信息中心1:1000000基础地理数据库(http://ngcc.sbsm.gov.cn)
	HAI	X_{15}	1 km×1 km	–	人为影响综合指数参考黄木易等[29]的研究方法
生态政策	林地增加面积/km^2	X_{16}	1 km×1 km	2000—2020	基于2000年和2020年两期土地利用数据,通过ArcGIS的空间叠置工具获得土地利用转移量
	草地增加面积/km^2	X_{17}	1 km×1 km	2000—2020	基于2000年和2020年两期土地利用数据,通过ArcGIS的空间叠置工具获得土地利用转移量
	荒漠增加面积/km^2	X_{18}	1 km×1 km	2000—2020	基于2000年和2020年两期土地利用数据,通过ArcGIS的空间叠置工具获得土地利用转移量

注:NDVI为归一化植被指数;NPP为净初级生产力;HAI为人为影响综合指数;"–"表示无数据。

2.2 研究方法

2.2.1 区域生态环境质量指数 基于"三生"空间土地利用功能分类体系,结合各地类规模及其生态环境质量的差异性,核算区域生态环境质量指数。公式如下[16]:

$$\mathrm{EV}_t = \sum_{i=1}^{n} C_i \times A_i / A \tag{1}$$

式中:EV_t 为区域第 t 时期 EQI;n 为土地利用功能二级分类数目;C_i 为第 i 地类的 EQI;A_i 为第 t 时期地类 i 的面积;A 为研究区面积。

2.2.2 土地利用转型的生态贡献率 土地利用转型的生态贡献率指某地类变化所导致的区域生态环境质量的改变程度,公式如下[16]:

$$\mathrm{CLEI} = \left(\mathrm{LE}_{t+1} - \mathrm{LE}_t\right)\mathrm{LA}/A \tag{2}$$

式中:CLEI为土地利用功能转型的生态贡献率;LE_{t+1}、LE_t 为某地类在变化初期和末期的EQI;LA为该变化地类的面积。

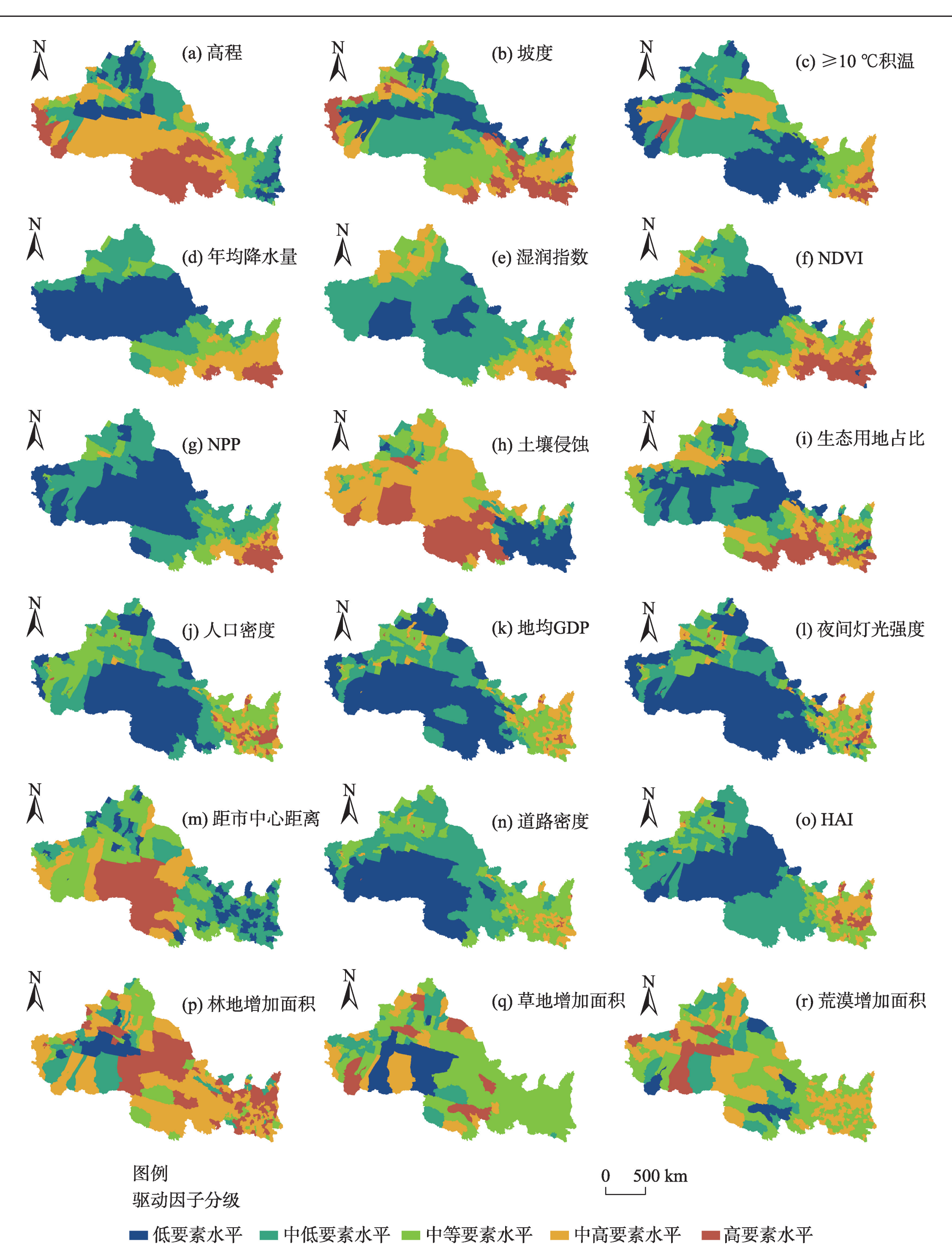
2.2.3 生态环境质量变化热点分析 采用ArcGIS空间分析工具中热点分析的Getis-Ord G_i^* 指数进行生态环境质量冷、热点的局部关联性分析。公式如下[29]:

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n W_{ij}(d) x_i}{\sum_j^n x_j} \tag{3}$$

$$Z\left(G_i^*\right) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\mathrm{Var}(G_i^*)}} \tag{4}$$

式中:G_i^* 为单元 i 的集聚指数;n 为研究单元数量;$W_{ij}(d)$ 为空间权重;x_i、x_j 为空间单元 i、j 的属性值;$Z\left(G_i^*\right)$ 为 G_i^* 标准化的值;$E(G_i^*)$、$\mathrm{Var}(G_i^*)$ 分别为 G_i^* 的数学期望和标准差。

2.2.4 生态环境质量空间分异的地理探测模型 地理探测器模型是基于空间分异理论,通过分析各因子层内方差和总方差的关系,探测自变量与因变量的相关性以及自变量之间交互作用的一种统计学方法。公式如下[33]:



注：NDVI为归一化植被指数；NPP为净初级生产力；HAI为人为影响综合指数。

图2 西北地区生态环境质量空间分异驱动因子分级

Fig. 2 Classification of driving factors for spatial differentiation of eco-environment quality in northwest China

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum_{i=1}^{L} N_i \sigma_i^2 \quad (5)$$

式中：q为各驱动因子探测值；N_i和N分别为分区和全区样本数；L为评价单元个数；σ_i^2和σ^2分别为分区和全区的离散方差。

3 结果与分析

3.1 西北地区"三生"空间转型

3.1.1 "三生"空间演变特征 通过分析西北地区"三生"空间分布与面积特征(图3、表3)，可以看出

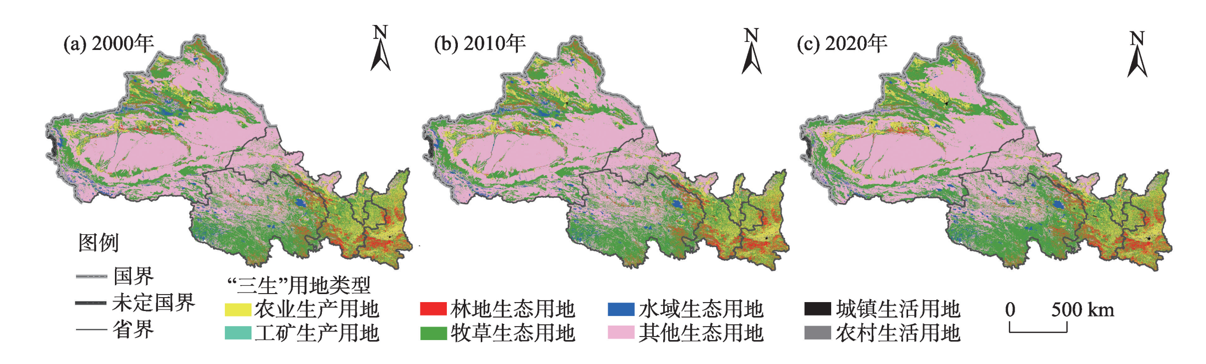


图3　2000—2020年西北地区"三生"空间分布

Fig. 3　Distributions of production-living-ecological space in northwest China from 2000 to 2020

表3　2000—2020年西北地区"三生"空间面积变化

Tab. 3　Area change of production-living-ecological space in northwest China from 2000 to 2020　/km²

年份	生活用地		生产用地		生态用地			
	城镇生活用地	农村生活用地	农业生产用地	工矿生产用地	牧草生态用地	林地生态用地	水域生态用地	其他生态用地
2000	1983.28	8959.37	222178.00	1106.69	1125831.79	155975.42	86115.79	1467749.67
2010	2662.36	9986.64	232118.83	1769.47	1112047.60	157607.45	87814.00	1465893.66
2020	5039.90	10587.50	246116.07	6134.80	1104010.72	155781.68	86555.63	1455674.49
2000—2010	679.08	1027.27	9940.82	662.79	−13784.19	1632.03	1698.21	−1856.01
2010—2020	2377.54	600.86	13997.24	4365.33	−8036.88	−1825.77	−1258.37	−10219.17

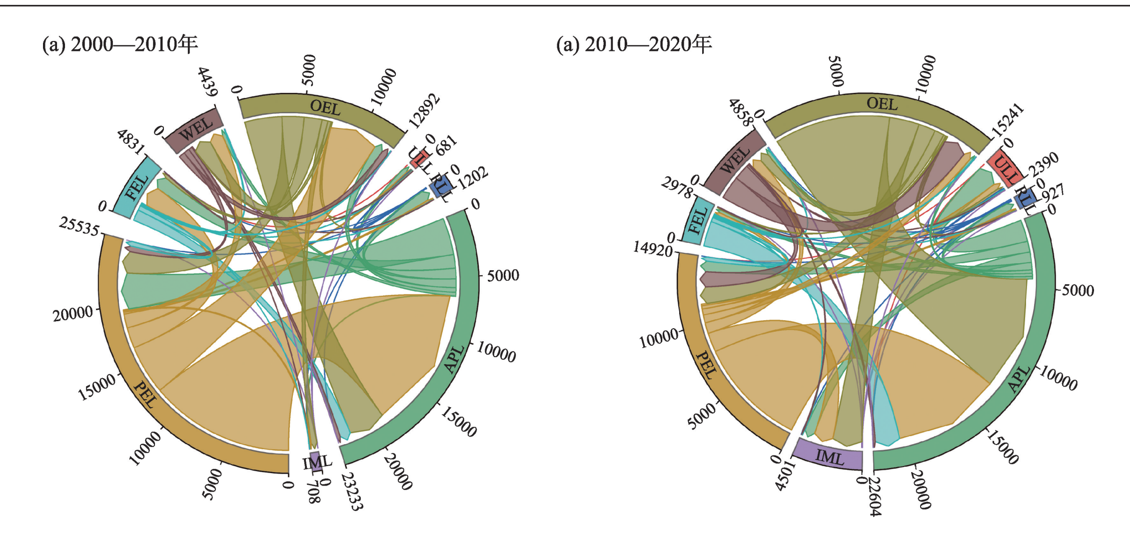
生态用地为主要用地类型，但面积呈减少趋势，从2000年的2835672.67 km²减少至2020年的2802022.52 km²，降幅为1.20%；生产用地和生活用地呈增加态势，分别从2000年的223284.69 km²、10942.65 km²增加至2020年的252250.87 km²、15627.40 km²，增幅分别为12.97%、42.81%，生产、生活用地的增加源于对生态用地的侵占。

从"三生"空间二级地类的分布来看，其他生态用地规模最大，主要分布于塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地和吐鲁番盆地等以及部分海拔较高的裸岩荒漠地区；其次为牧草生态用地，集中分布于青海、新疆的高寒牧区以及陕甘宁部分干旱、半干旱地区；农业生产用地主要位于宁夏平原、关中平原以及河西走廊和天山北坡的绿洲区；水域生态用地以高原湖泊和冰川为主，分布于青海、新疆的高海拔地区；林地生态用地主要分布于秦岭、祁连山、天山等山地；工矿生产用地、城镇生活用地和农村生活用地规模较小，空间分布较为零散。就"三生"空间二级地类的结构变化而言，2000—2020年牧草和其他生态用地面积大幅减少，减幅分别为21821.07 km²和12075.18 km²；农业和工矿生产用地、城镇和农村生活用地面积呈增加趋势，分别增加了23938.07 km²、5028.11 km²、3056.62 km²和1628.13 km²。

3.1.2　"三生"空间转型模式　通过土地利用转移弦图来直观表征各地类间的相互转化特征(图4)。可以看出：2个时期土地利用转移方向基本一致，而转移规模存在较大差异。从转移方向来看，林地、牧草和其他生态用地主要转化为农业生产用地，同时农业生产用地也向牧草生态用地、城镇和农村生活用地发生转移。就转移规模而言，2000—2010年发生转移的地类面积合计36760.89 km²，转移率为1.19%；2010—2020年发生转移的地类面积合计34209.76 km²，转移率为1.11%。

3.2　西北地区生态环境时空分异

3.2.1　时序变化特征　西北地区生态环境质量指数从2000年的0.22720升至2010年的0.22724后降至2020年的0.22699，生态环境质量整体保持相对稳定。为进一步揭示地类转移与生态环境质量的关联关系，测算了各功能用地转型的生态贡献率(图5)。结果显示，2000—2010年西北地区生态环境质量的改善主要得益于其他生态用地转化为农业生



注：ULL为城镇生活用地(km²)；RLL为农村生活用地(km²)；APL为农业生产用地(km²)；IML为工矿生产用地(km²)；PEL为牧草生态用地(km²)；FEL为林地生态用地(km²)；WEL为水域生态用地(km²)；OEL为其他生态用地(km²)。

图4 2000—2020年西北地区“三生”空间土地利用转移弦图

Fig. 4 Chord diagram of land use transfer of production-living-ecological space in northwest China from 2000 to 2020

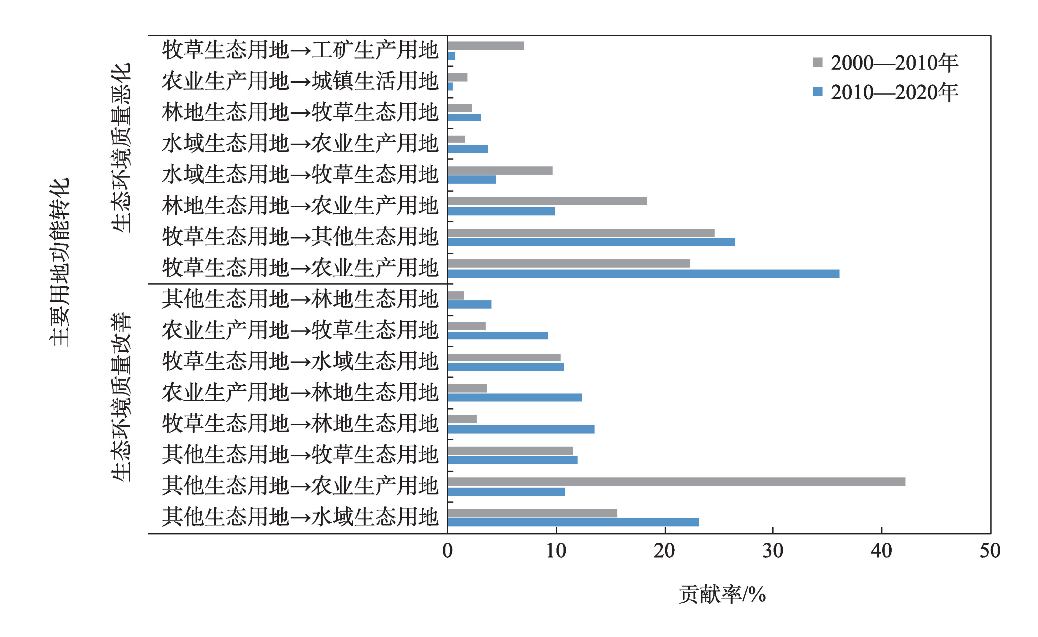


图5 2000—2020年西北地区生态环境质量变化的主要用地转型及其贡献率

Fig. 5 Major land use transition and contribution rate of eco-environmental quality change in northwest China from 2000 to 2020

产用地、水域生态用地和牧草生态用地；生态环境质量的恶化主要是由于牧草生态用地的退化以及农业生产用地对林地和牧草生态用地的占用造成。2010—2020年“三生”空间转型对生态环境质量的作用与2000—2010年相比发生了显著变化，主要表现在其他生态用地转化为农业生产用地的贡献率明显下降，农业生产用地和牧草生态用地转化为林地生态用地的贡献率有所提升。同时，由于其他生态用地对牧草生态用地占用的生态贡献率仍维持在较高水平，加之农业生产用地对牧草生态用地占用的贡献率有所上升，从而导致了区域生态环境质量呈下降趋势。

3.2.2 空间分异特征 基于县域尺度分别表征2000、2010年和2020年西北地区生态环境质量的空间分异性，并依据自然间断点法划分为5个等级。从图6可以看出，西北地区生态环境质量空间分异显著，呈现出“东南较高、西北次之、中部较低”的格局特征。低质量区主要集中在塔里木盆地、吐鲁番盆地

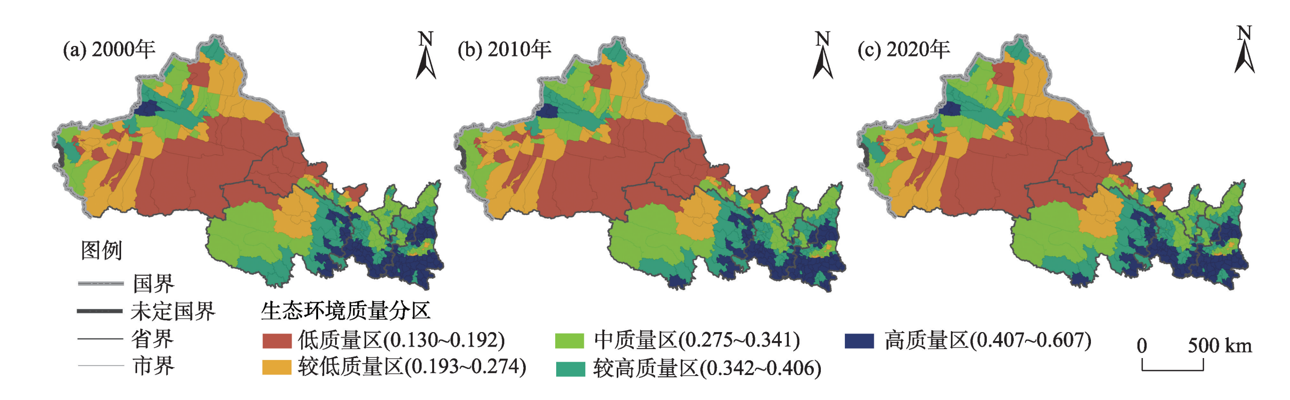


图6　2000—2020年西北地区生态环境质量空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of eco-environmental quality in northwest China from 2000 to 2020

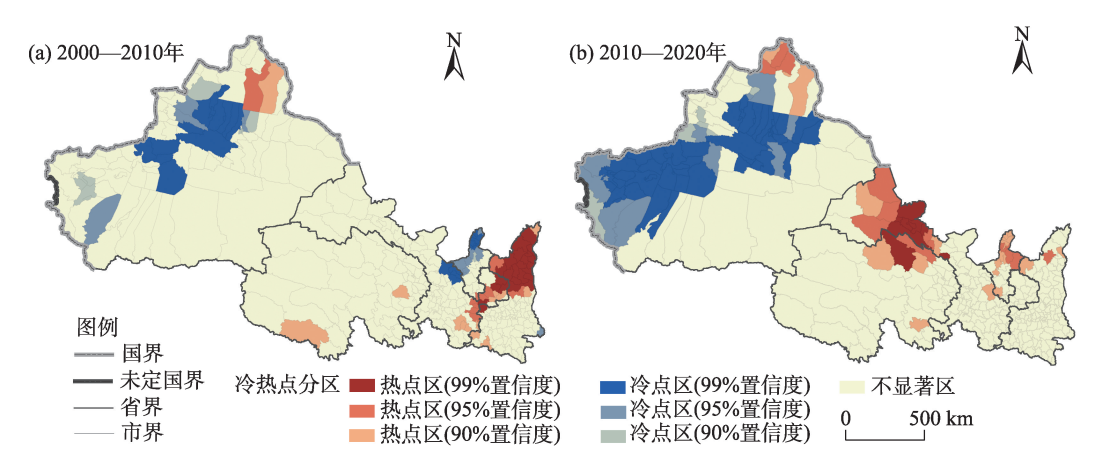


图7　2000—2020年西北地区生态环境质量变化的冷热点分布

Fig. 7　Spatial distributions of hot spots and cold spots of eco-environmental quality changes in northwest China from 2000 to 2020

和哈密盆地以及河西走廊以北地带，空间集聚特征明显；较低质量区主要分布在青海西北、新疆西南和西北部，空间上呈组团分布态势且紧邻低质量区；中质量区主要位于天山南北两侧的绿洲区、陕甘宁的农牧交错区以及河西走廊和银川平原的灌溉区；较高质量区和高质量区主要位于天山、阿尔泰山、祁连山、秦岭等林地资源较为丰富的山地。

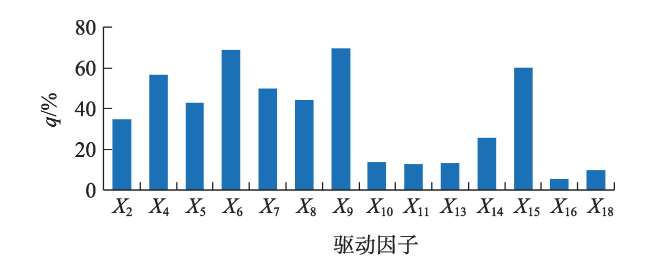
为进一步刻画生态环境质量空间演化特征，核算了2000—2010年、2010—2020年西北地区生态环境质量变化的Moran's I指数，结果发现Moran's I指数均为正且通过显著性检验，表明区域生态环境质量演化具有明显的空间集聚性。同时运用ArcGIS热点分析工具进行局部空间自相关分析(图7)，结果显示：2000—2010年西北地区生态环境质量演化的热点区主要集聚在陕西北部和甘肃陇东地区；生态环境质量演化的冷点区主要集中在宁夏沿黄地区和新疆西北部。2010—2020年生态环境质量演化的热点区主要位于宁夏北部和甘肃西北部；生态环境质量演化的冷点区仍集中于新疆西北部，且范围进一步扩大。综合来看，2000—2020年西北地区生态环境质量空间格局演化的冷、热点区主要位于其东南和西北部，中部地区相对稳定，这与区域内人口、产业的空间分布紧密相关。

3.3　生态环境质量空间分异机制

在运用地理探测器之前，首先对驱动因素进行了相关性分析和显著性检验，结果显示所选因子中高程(X_1)、≥10 ℃积温(X_3)、夜间灯光强度(X_{12})和草地增加面积(X_{17})未通过显著性检验，对其进行了删减处理；其次，通过测度方差膨胀因子，发现模型构建良好，不存在多重共线性；最后，以生态环境质量指数为因变量，剩余14项指标因子作为自变量，利用地理探测器模型进行生态环境质量空间分异主

导因子以及各因子之间交互作用机理的定量分析。

图8显示，所筛选驱动因子对西北地区生态环境质量的空间分异均产生了一定程度的影响。各驱动因子按照解释力(q)统计量的大小排序为：生态用地占比(X_9)>NDVI(X_6)>人为影响综合指数(X_{15})>年均降水量(X_4)>NPP(X_7)>土壤侵蚀(X_8)>湿润指数(X_5)>坡度(X_2)>道路密度(X_{14})>人口密度(X_{10})>距市中心距离(X_{13})>地均GDP(X_{11})>荒漠增加面积(X_{18})>林地增加面积(X_{16})。其中，生态用地占比和NDVI的因子探测q统计量分别达69.5%和68.9%，反映出生态用地结构和植被覆盖程度对生态环境质量的空间分异影响程度最大；其次，人为影响综合指数和年均降水量的q值也接近60.0%，表明人类活动和降水量也是生态环境质量空间分异的主导因素；最后，自然因子中的NPP、土壤侵蚀、湿润指数和坡度的q值达30.0%以上，对区域生态环境质量的空间分异产生了一定程度的影响。此外，社会经济因子中道路密度、人口密度、距市中心距离、地均GDP探测结果q值介于10.0%~30.0%之间，表明其对生态环境质量空间分异起到了较为重要的作用；而生态政策中的荒漠增加面积、林地增加面积的q值在10.0%以下，对生态环境质量空间分异的影响程度较弱。



注：q为解释力；X_2为坡度；X_4为年均降水量；X_5为湿润指数；X_6为NDVI；X_7为NPP；X_8为土壤侵蚀；X_9为生态用地占比；X_{10}为人口密度；X_{11}为地均GDP；X_{13}为距市中心距离；X_{14}为道路密度；X_{15}为人为影响综合指数；X_{16}为林地增加面积；X_{18}为荒漠增加面积。下同。

图8 西北地区生态环境质量空间分异驱动因子贡献率

Fig. 8 Contribution rates of driving factors for spatial differentiation of eco-environmental quality in northwest China

西北地区生态环境质量空间分异的驱动因子交互探测结果表明，所选因子之间的交互类型以双因子增强和非线性增强为主，说明导致西北地区生态环境质量空间分异是多因素之间复杂耦合作用的结果，并非单一影响因子造成(图9)。其中，自然因子内部以及自然因子与社会经济因子之间的交互作用较强，尤其生态用地占比、NDVI与其他因子之间交互作用对生态环境质量空间分异产生了重要影响。社会经济因子之间的交互作用较弱，但社会经济因子与自然因子之间的协同增强对西北干旱区生态环境质量空间分异程度产生了较大影响。

4 讨论与结论

4.1 讨论

随着“西部大开发”“一带一路”和“黄河流域生态保护与高质量发展”等国家战略的实施，西北地区的经济发展格局、国土空间开发利用格局和生态安全格局处于不断演化和重构的过程之中。厘清“三生”空间演化与生态环境质量的关联关系，识别生态环境质量演化的活跃区，并揭示其空间分异机制，很大程度上可为西北地区国土空间的有序开发、土地资源的集约利用和生态风险的有效管控提供理论依据。通过本文研究发现：(1) 西北地区生态环境质量整体相对稳定，但局部变化明显。西北地区戈壁、荒漠广布且空间分布较为集中，其生态环境质量较为稳定，一定程度上决定了西北地区生态环境质量的整体变化格局；同时，在城市边缘区、农牧交错带、绿洲外围过度区等局部区域受人类活动干扰程度较大，生态环境质量变化明显。(2) 西北地区未利用地面积广阔，开发利用潜力较大，但其生态环境脆弱，开发利用难度较大，如何协调其保护与开发关系对于西北地区生态建设至关重要。(3) 绿洲是干旱区人地关系最为复杂和生态环境较为敏感的典型区域，脆弱的自然本底使其对水土资源的开发利用响应强烈。因此，需改善和优化土地利用结构和产业结构，因地制宜适度发展城市规模，对于人口密集而生态承载能力有限的区域应加强产业和人口疏解，实施生态移民措施，推动区域社会、经济和生态系统的耦合协调发展。此外，本文基于土地利用主导功能构建了三生空间分类体系，一定程度上为三生空间的演进特征和生态效应分析提供了基础，但在后续的研究中还有待综合考虑土地利用的多功能性。同时，受数据来源、精度限制，本研究在“三生”空间演变和转移特征分析、

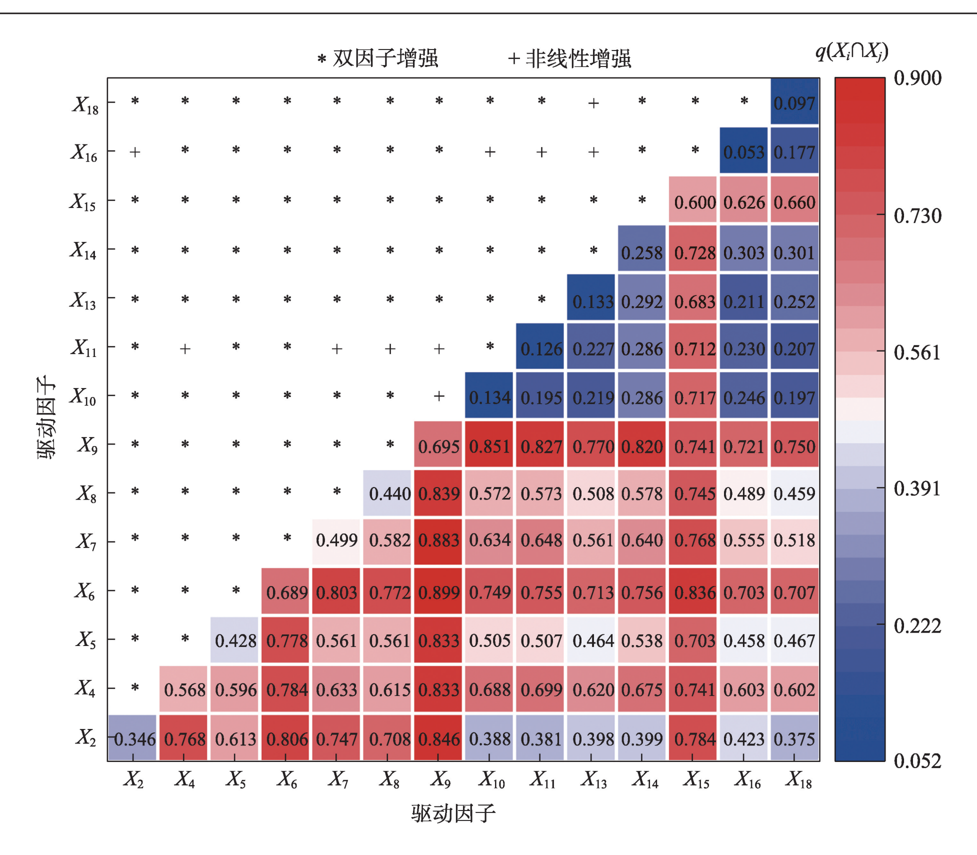


图9 西北地区生态环境质量空间分异驱动因子的交互探测结果

Fig. 9 Interactive detection results of driving factors of spatial differentiation of eco-environmental quality in northwest China

空间分异影响因素探讨等方面可能存在一定局限性，而借助更详细的数据从微观或多尺度系统性探讨生态环境质量的演变特征和空间分异机理将是下一步的研究方向。

4.2 结论

（1）西北地区生产、生活空间主要集中于宁夏平原、关中平原、河西走廊和天山北坡等地区且呈扩张态势；生态空间主要分布于阿尔泰山、天山、祁连山、秦岭等山地和塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地等以及黄土高原丘陵地区且呈缩减趋势。

（2）西北地区生态环境质量指数从2000年的0.22720升至2010年的0.22724后降至2020年的0.22699，生态环境质量基本维持稳定，主要是由于生态环境质量改善和恶化相互抵消造成的结果。

（3）西北地区生态环境质量空间上呈“东南较高、西北次之、中部较低”的格局特征，生态环境质量演化的冷、热点区主要集中于东南和西北部，这与区域内人口、产业的空间分布紧密相关。

（4）地理探测结果表明，生态用地结构、NDVI和人类活动是生态环境质量空间分异的主导因素，自然因子内部以及自然因子与社会经济因子的交互协同增强效应共同影响了区域生态环境质量在空间上的分异效果。

参考文献（References）

[1] Liu Y, Huang X J, Yang H, et al. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in southwest China Karst area: A case study of Guiyang[J]. Habitat International, 2014, 44: 339–348.

[2] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change[J]. Land Use Policy, 2010, 27(2): 108–118.

[3] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2173–2187. [Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Zeng Jie, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China[J]. Geographical Research, 2019, 38(9): 2173–2187.]

[4] 邹利林, 王建英, 胡学东. 中国县级“三生用地”分类体系的理论构建与实证分析[J]. 中国土地科学, 2018, 32(4): 59–66. [Zou Lilin, Wang Jianying, Hu Xuedong. An classification systems of production-living-ecological land on the county level: Theory building and empirical research[J]. China Land Science, 2018, 32(4): 59–66.]

[5] 刘继来, 刘彦随, 李裕瑞. 中国"三生空间"分类评价与时空格局分析[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1290-1304. [Liu Jilai, Liu Yansui, Li Yurui. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of "production-living-ecological" spaces in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1290-1304.]

[6] 张红旗, 许尔琪, 朱会义. 中国"三生用地"分类及其空间格局[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1332-1338. [Zhang Hongqi, Xu Erqi, Zhu Huiyi. An ecological-living-industrial land classification system and its spatial distribution in China[J]. Resources Science, 2015, 37(7): 1332-1338.]

[7] 逯承鹏, 纪薇, 刘志良, 等. 黄河流域甘肃段县域"三生"功能空间时空格局及影响因素识别[J]. 地理科学, 2022, 42(4): 579-588. [Lu Chengpeng, Ji Wei, Liu Zhiliang, et al. Spatial-temporal pattern and influencing factors of the "production-living-ecological" functional space of the Yellow River Basin at county level in Gansu, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(4): 579-588.]

[8] 马彩虹, 安斯文, 文琦, 等. 基于土地利用转移流的国土空间格局演变及其驱动机制研究——以宁夏原州区为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 925-934. [Ma Caihong, An Siwen, Wen Qi, et al. Evolution of territorial spatial pattern and its driving mechanism based on land use transfer flow: A case of Yuanzhou District in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 925-934.]

[9] 凌子燕, 李延顺, 蒋卫国, 等. 山江海交错带城市群国土三生空间动态变化特征——以广西北部湾城市群为例[J]. 经济地理, 2022, 42(2): 18-24. [Ling Ziyan, Li Yanshun, Jiang Weiguo, et al. Dynamic change characteristics of "production-living-ecological spaces" of urban agglomeration interlaced with mountains, rivers and sea: A case study of the Beibu Gulf urban agglomeration in Guangxi[J]. Economic Geography, 2022, 42(2): 18-24.]

[10] 林佳, 宋戈, 张莹. 国土空间系统"三生"功能协同演化机制研究——以阜新市为例[J]. 中国土地科学, 2019, 33(4): 9-17. [Lin Jia, Song Ge, Zhang Ying. Synergistic evolution mechanism of "production-living-ecology" functions in spatial planning system: A case study of Fuxin City[J]. China Land Science, 2019, 33(4): 9-17.]

[11] 牛雅萱, 吴世新, 郭晨宇, 等. 新疆县市"三生"功能时空变化及耦合协调性分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1821-1835. [Niu Yaxuan, Wu Shixin, Guo Chenyu, et al. Spatio-temporal changes and coupling coordination of the function of "production-living-ecological" in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1821-1835.]

[12] 王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1100-1114. [Wang Cheng, Tang Ning. Spatio-temporal characteristics and evolution of rural production-living-ecological space function coupling coordination in Chongqing Municipality[J]. Geography Research, 2018, 37(6): 1100-1114.]

[13] 廖李红, 戴文远, 陈娟, 等. 平潭岛快速城市化进程中三生空间冲突分析[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1823-1833. [Liao Lihong, Dai Wenyuan, Chen Juan, et al. Spatial conflict between ecological-production-living spaces on Pingtan Island during rapid urbanization[J]. Resources Science, 2017, 39(10): 1823-1833.]

[14] 吴艳娟, 杨艳昭, 杨玲, 等. 基于"三生空间"的城市国土空间开发建设适宜性评价——以宁波市为例[J]. 资源科学, 2016, 38(11): 2072-2081. [Wu Yanjuan, Yang Yanzhao, Yang Ling, et al. Land spatial development and suitability for city construction based on ecological-living-industrial space: Take Ningbo City as an example[J]. Resources Science, 2016, 38(11): 2072-2081.]

[15] 马世发, 黄宏源, 蔡玉梅, 等. 基于三生功能优化的国土空间综合分区理论框架[J]. 中国国土资源经济, 2014, 27(11): 31-34. [Ma Shifa, Huang Hongyuan, Cai Yumei, et al. Theoretical framework with regard to comprehensive sub-areas of China's land spaces based on the functional optimization of production, life and ecology[J]. Natural Resource Economics of China, 2014, 27(11): 31-34.]

[16] 杨清可, 段学军, 王磊, 等. 基于"三生空间"的土地利用转型与生态环境效应——以长江三角洲核心区为例[J]. 地理科学, 2018, 38(1): 97-106. [Yang Qingke, Duan Xuejun, Wang Lei, et al. Land use transformation based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects: A case study in the Yangtze River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(1): 97-106.]

[17] Long H L, Liu Y Q, Hou X G, et al. Effects of land use transitions due to rapid urbanization on ecosystem services: Implications for urban planning in the new developing area of China[J]. Habitat International, 2014, 44: 536-544.

[18] Estoque R C, Murayama Y. Landscape pattern and ecosystem service value changes: Implications for environmental sustainability planning for the rapidly urbanizing summer capital of the Philippines[J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 116(4): 60-72.

[19] 梁国付, 丁圣彦. 气候和土地利用变化对径流变化影响研究——以伊洛河流域伊河上游地区为例[J]. 地理科学, 2012, 32(5): 635-640. [Liang Guofu, Ding Shengyan. The impacts of climate and landuse changes on the runoff effects: Case in the upper reaches of the Yihe River, the Yiluo River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(5): 635-640.]

[20] Liu Y Q, Long H L, Li T T, et al. Land use transitions and their effects on water environment in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Land Use Policy, 2018, 47: 293-301.

[21] 董建红, 张志斌, 张文斌, 等. "三生"空间视角下土地利用转型的生态环境效应及驱动力——以甘肃省为例[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 5919-5928. [Dong Jianhong, Zhang Zhibin, Zhang Wenbin, et al. Eco-environmental effects of land use transformation and its driving forces from the perspective of "production-living-ecological" space: A case study of Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 5919-5928.]

[22] Niedertscheider M, Gingrich S, Erb K H. Changes in land use in

south Africa between 1961 and 2006: An integrated socio-ecological analysis based on the human appropriation of net primary production framework[J]. Regional Environmental Change, 2012, 12(4): 715-727.

[23] Li Y R, Cao Z, Long H L, et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142(2): 697-715.

[24] Matsushita B, Yang W, Chen J, et al. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density cypress forest[J]. Sensors, 2007, 7(11): 2636-2651.

[25] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862. [Xu Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862.]

[26] 石三娥, 魏伟, 杨东, 等. 基于RSEDI的石羊河流域绿洲区生态环境质量时空演变[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1152-1163. [Shi San'e, Wei Wei, Yang Dong, et al. Spatial and temporal evolution of eco-environmental quality in the oasis of Shiyang River Basin based on RSEDI[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1152-1163.]

[27] 涂小松, 龙花楼. 2000—2010年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化[J]. 资源科学, 2018, 37(12): 2451-2460. [Tu Xiaosong, Long Hualou. Spatial patterns and dynamic evolution of ecosystem service values in Poyang Lake region from 2000 to 2010[J]. Resources Science, 2018, 37(12): 2451-2460.]

[28] 戴文远, 江方奇, 黄万里, 等. 基于"三生空间"的土地利用功能转型及生态服务价值研究——以福州新区为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2098-2109. [Dai Wenyuan, Jiang Fangqi, Huang Wanli, et al. Study on transition of land use function and ecosystem service value based on the conception of production, living and ecological space: A case study of the Fuzhou new area[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(12): 2098-2109.]

[29] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970—2018年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920. [Huang Muyi, Yue Wenze, Fang Bin, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain area, central China from 1970 to 2018[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1904-1920.]

[30] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 161-173. [Liu Yansui, Li Jintao. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 161-173.]

[31] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1411-1420. [Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Xu Xinliang, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12): 1411-1420.]

[32] 崔佳, 臧淑英. 哈大齐工业走廊土地利用变化的生态环境效应[J]. 地理研究, 2013, 32(5): 848-856. [Cui Jia, Zang Shuying. Regional disparities of land use changes and their eco-environmental effects in Harbin-Daqing-Qiqihar Industrial Corridor[J]. Geography Research, 2013, 32(5): 848-856.]

[33] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

Geographical exploration of the spatial differentiation mechanism of eco-environmental quality in northwest China from the perspective of "production-living-ecological" space

DONG Jianhong[1], ZHANG Zhibin[2], LIU Benteng[1], ZHANG Xinhong[1]

(1. College of Design and Art, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This study attempts to measure the eco-environmental effects of land use transformation in northwest China from 2000 to 2020 based on the perspective of land "production-living-ecological" function. For this, the study employs the eco-environmental quality index and ecological contribution rate model, and comprehensively uses hot-spots analysis tool, Geo-detectors tool, and other methods to discuss the evolution characteristics and differentiation mechanism of eco-environmental quality. The findings of this study show: (1) The "production-living-ecological" space in northwest China shows significant spatial differentiation, indicating an increasing trend of production and living space and a decreasing trend of ecological space. (2) The eco-environmental quality index increased from 0.22720 in 2000 to 0.22724 in 2010 and then decreased to 0.22699 in 2020, although the overall eco-environmental quality remained relatively stable. The change in eco-environmental quality exhibited both improvement and deterioration. The improvement of eco-environmental quality mainly depends on the protection of regional ecological space, while the deterioration of eco-environmental quality is that agricultural production land occupies ecological land in pastoral areas. (3) The eco-environmental quality is spatially characterized by "high in the southeast, second in the northwest, low in the middle". The cold-spots and hot-spots in the evolution of the eco-environmental quality pattern are mainly concentrated in the southeast and northwest regions and have the same spatial distribution as the population and industry in the area. (4) The proportions of ecological land use, normalized vegetation index, and human active index were the leading factor of spatial differentiation of eco-environmental quality; the interactions between the influencing factors mainly include nonlinear enhancement and bi-factor enhancement. The internal interaction of natural factors and the interaction between natural factors and socio-economic factors affected the spatial differentiation characteristics of eco-environmental quality in northwest China. The results of this study may provide a theoretical basis for the optimization of the national land spatial pattern and ecological environment protection in northwest China.

Key words: land use function transformation; eco-environmental quality; spatial differentiation; northwest China